



**GRUPO - IV**

**GRUPO DE ESTUDO ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT**

**MODELADO EN ATP DE UNA ESTACIÓN CONVERSORA DE FRECUENCIA HVDC  
BACK-TO-BACK DE 500 MW ENTRE URUGUAY Y BRASIL**

**Graciela Calzolari (\*)**  
**UTE**

**Claudio Saldaña**  
**UTE**

**RESUMEN**

Con el objetivo de interconectar los sistemas de potencia de Uruguay y Brasil, de diferentes frecuencias nominales, una nueva estación conversora de frecuencia HVDC Back-to-Back (BtB) de 500 MW fue construída. Un modelo detallado de este BtB ha sido desarrollado por los autores para el programa ATP (Alternative Transients Program), para la realización de estudios de transitorios electromagnéticos (EMT). Este artículo presenta los siguientes aspectos relacionados con el modelado llevado a cabo: los principales datos técnicos de la estación conversora, las Características Estáticas en condiciones de operación normal y en falta, curvas enlace de flujo versus corriente y cálculo de los flujos residuales de los transformadores convertidores, loops de control DC, puentes convertidores y esquema de disparo de los tiristores, control de las sobre/sub tensiones temporarias, inicialización del modelo del BtB. Con el objetivo de validar el modelo desarrollado en ATP, fueron simuladas faltas trifásicas balanceadas en los lados rectificador e inversor y los resultados obtenidos fueron comparados con los suministrados por el fabricante, que modeló la estación conversora con el programa PSCAD (Power System Computer Aided Design).

**PALABRAS-CLAVE**

HVDC Back-to-back, estación conversora, modelado, ATP.

**1.0 - INTRODUCCIÓN**

Una nueva estación conversora de frecuencia HVDC Back-to-Back (BtB) de 500 MW fue puesta en servicio en marzo del año 2016. Este BtB interconecta los sistemas eléctricos de potencia de Uruguay (500 kV, 50 Hz) y Brasil (525 kV, 60 Hz) con una potencia nominal transferida, en ambas direcciones, de 508 MW. Esta estación conversora está ubicada en el departamento de Cerro Largo en territorio uruguayo y es el segundo vínculo HVDC Back-to Back entre Uruguay y Brasil. Una línea de trasmisión de 525 kV y longitud 122 km interconecta el BtB con la estación Candiota en territorio brasileño.

El primer vínculo HVDC Back-to Back entre Uruguay y Brasil, está ubicado en el departamento de Rivera en territorio uruguayo con una potencia nominal transferida, en ambas direcciones, de 70 MW e interconecta el sistema eléctrico de potencia de Uruguay (150 kV, 50 Hz) y el sistema eléctrico de potencia de Brasil (230 kV, 60 Hz).

El diseño y la operación de un sistema eléctrico de potencia exigen la realización de estudios de régimen permanente, transitorios electromagnéticos y electromecánicos. Debido a operaciones de maniobra y ocurrencias de perturbaciones en una red eléctrica, los intercambios de energía entre los campos eléctrico y magnético imponen altas sollicitaciones en los equipamientos como resultado de excesivas variaciones en corrientes y/o tensiones, cuya estimación es el principal objetivo de las simulaciones de transitorios electromagnéticos (EMT) en un sistema de potencia. La presencia de un vínculo HVDC en un sistema de potencia requiere entre otros estudios el análisis de transitorios electromagnéticos debidos a, por ejemplo, aplicación y eliminación de faltas balanceadas

y desbalanceadas, recierres exitosos y no exitosos en líneas de transmisión, rechazos de carga, interacciones torsionales subsíncronas con centrales termoeléctricas próximas, etc.

Un modelo detallado de este BtB ha sido desarrollado por los autores para el programa ATP (Alternative Transients Program), para la realización de estudios de transitorios electromagnéticos (EMT). Este programa de transitorios electromagnéticos y electromecánicos de amplia utilización en las empresas de energía eléctrica, es el utilizado por la empresa de energía eléctrica en Uruguay desde el año 1986.

Este artículo se enfoca en: las principales características técnicas del BtB, el modelo en ATP y su validación a través de la comparación de resultados obtenidos con ATP contra resultados de PSCAD suministrados por el fabricante.

## 2.0 - DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN CONVERTSORA

La Figura 1 muestra en forma esquemática el diagrama unifilar de la estación convertidora y las redes de potencia a ambos lados de la misma. Sus principales características técnicas DC son: a) Potencias nominal y máxima iguales a 508 MW y 559 MW respectivamente b) Corriente nominal igual a 3206 A c) Voltaje nominal igual a  $\pm 79.2$  kV.

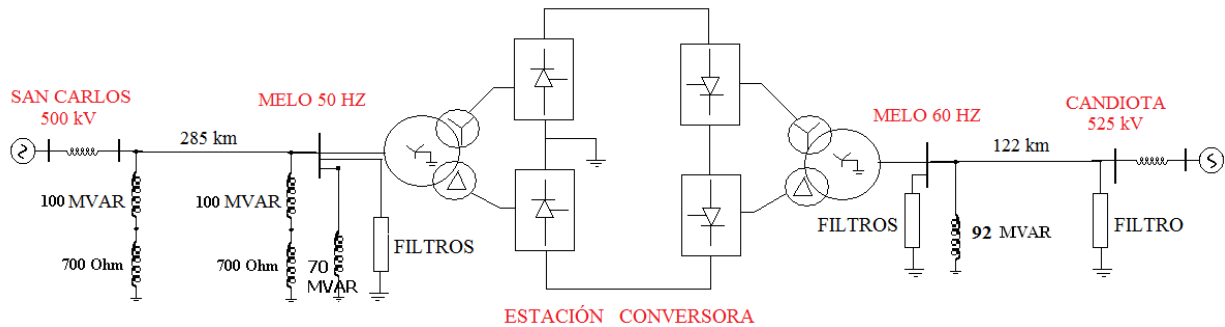


FIGURA 1 – Diagrama unifilar Estación Convertidora

Los transformadores convertidores a ambos lados (Melo 50 Hz, Melo 60 Hz) son bancos de transformadores monofásicos de tres devanados, tipo de conexión estrella/estrella/triángulo, grupo de conexión YN/y0/d11. Cada unidad monofásica tiene las siguientes características: a) Melo 50 Hz, potencias aparentes 216/108/108 MVA, tensiones nominales  $500/\sqrt{3}/70/\sqrt{3}/70$  kV b) Melo 60 Hz, potencias aparentes 216/108/108 MVA, tensiones nominales  $525/\sqrt{3}/70/\sqrt{3}/70$  kV.

Teniendo en cuenta que los convertidores DC inherentemente consumen potencia reactiva y generan armónicos de tensión y corriente en ambas redes AC y DC, fueron diseñados filtros capacitivos maniobrables e instalados en ambos lados AC de alta tensión (500 kV, 525 kV). En el lado Melo 50 Hz hay tres bancos de filtros de 110 MVAR cada uno, sintonizados a las frecuencias armónicas  $11^{avo}/14^{avo}/24^{avo}$ . En el lado Melo 60 Hz hay cuatro bancos de filtros de 96 MVAR cada uno, dos sintonizados a las frecuencias armónicas  $13^{avo}/24^{avo}/36^{avo}$  y dos sintonizados a  $3^{er}/13^{avo}/47^{avo}$ . Fue necesario conectar un filtro adicional de 65 MVAR en la estación Candiota del sistema brasileño.

El diseño de la estación convertidora consideró los siguientes valores mínimos de potencia de cortocircuito: a) Melo 50 Hz, 1250 MVA, X/R= 4 b) Melo 60 Hz, 1400 MVA, X/R=9.

Los puentes convertidores consisten de tiristores para alta tensión, conectados en una configuración de doce pulsos, como puede ser observado en la Figura 1.

Debido a la especificación técnica contenida en el pliego de la licitación, la estación convertidora y su equipamiento asociado no fueron diseñados para un esquema de recierre monofásico en las líneas San Carlos – Melo 50 Hz y Melo 60 Hz – Candiota. Como consecuencia de esto para cualquier tipo de falta en: a) la línea San Carlos – Melo 50 Hz el sistema de protección dará una orden de apertura trifásica a los interruptores del tramo al cual está conectado el transformador convertidor, seguido por una orden de recierre trifásico luego de transcurridos 500 ms, simultáneamente a la apertura y cierre de los interruptores de línea. Esto permite la aplicación de un esquema de recierre monofásico en la línea b) la línea Melo 60 Hz – Candiota el sistema de protección dará una orden de apertura trifásica con posterior recierre trifásico a los interruptores que están asociados tanto al transformador convertidor como a la línea, hay un único tramo. En este caso no es posible aplicar un esquema de recierre monofásico.

Además de los loops de control DC hay otras funciones de Control Auxiliares presentadas en la Tabla 1.

## 3.0 - COMPORTAMIENTO DINÁMICO

La operación de los loops de control DC se refleja en las denominadas Características Estáticas mostradas en la Figura 2. Las Características Estáticas son graficadas en un plano  $V_{dc} - I_{dc}$  e ilustran los requerimientos de los sistemas de control de los puentes rectificador e inversor. Los segmentos de la característica del rectificador corresponden a los siguientes loops de control: **AB** "máxima tensión DC", **BC** "mínimo ángulo de disparo ( $\alpha$ )", **CD** "corriente DC" cuyo diagrama de bloques está mostrado en la Figura 3, **GH** "control del ángulo de extinción ( $\gamma$ ) del inversor", **DEF** "low voltage current clamp (LVCC)".

Los segmentos de la característica del inversor corresponden a los siguientes loops de control: **VW** “mínima tensión DC”, **WX** “voltage dependent current order limit (VDCOL)”, **XY** “tensión DC” cuyo diagrama de bloques está mostrado en la Figura 4, **YZ** “mínimo ángulo de extinción ( $\gamma$ ) del inversor”. En condiciones normales de operación el punto de trabajo (OP) del BtB es la intersección de los segmentos **CD** y **XY**.

TABLA 1 – Funciones de Control Auxiliares

Funciones de Control Auxiliares	
Nombre	Descripción
Control del cambiador de tomas (taps)	Controla una de las siguientes magnitudes: voltaje del devanado de válvula/ángulo de disparo/tensión DC.
Control del intercambio de potencia reactiva (Q) (CIPR)	Controla el intercambio de Q variando la tensión DC o la relación de transformación del transformador convertidor.
Control de la tensión AC en la barra de conmutación (CTAC)	Controla la tensión AC variando la tensión DC o la relación de transformación del transformador convertidor.
Control de la estabilidad de tensión AC	Controla la tensión AC del lado rectificador modulando la potencia DC.
Control de potencia reactiva en loop abierto	Maniobra filtros de acuerdo a la consigna de potencia DC.
Control de sobre/sub tensión temporaria (CTOU)	Maniobra filtros/reactor cuando la tensión AC está fuera de la banda de consigna de operación.

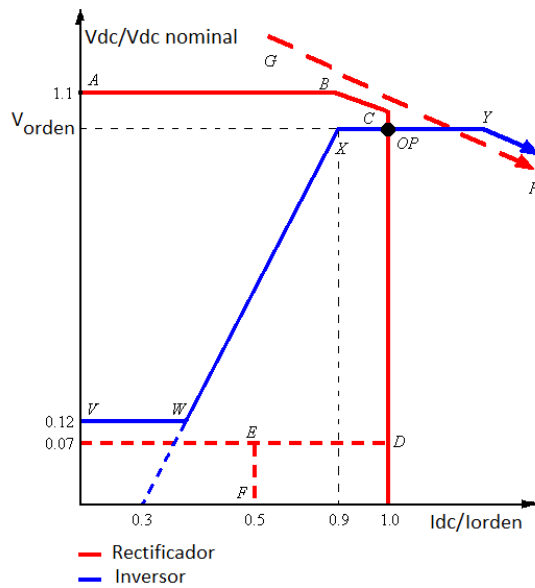


FIGURA 2 – Característica Estática del BtB

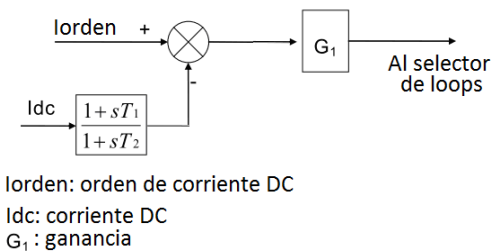


FIGURA 3 – Loop de corriente DC

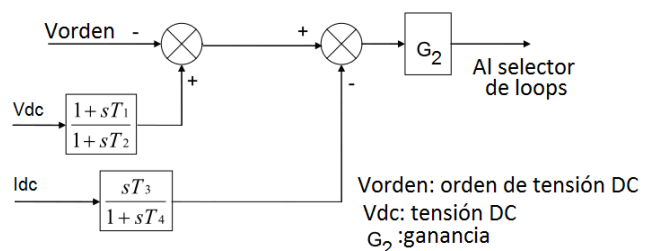


FIGURA 4 – Loop de tensión DC

La orden de potencia DC (Porden) es fijada por el operador del sistema de potencia, la señal Vorden resulta de uno de los siguientes modos de operación: a) control del intercambio de potencia reactiva entre el sistema de potencia y la estación convertora b) control de la tensión AC de la barra de conmutación. La señal lorden se obtiene dividiendo Porden/Vorden.

Si se produce una reducción de la tensión AC del lado rectificador, el loop “mínimo ángulo de disparo ( $\alpha$ )” toma el control del rectificador y el loop “voltage dependent current order limit (VDCOL)” toma el control del inversor, siendo el nuevo punto de operación (OP) el indicado en la Figura 5.

Si se produce una moderada reducción de la tensión AC del lado inversor, el loop “corriente DC” mantiene el control del rectificador y el loop “mínimo ángulo de extinción ( $\gamma$ ) del inversor” toma el control del inversor, siendo el nuevo punto de operación (OP) el indicado en la Figura 6.

Si se produce una gran reducción de la tensión AC del inversor, para mantener el mismo valor de lorden el ángulo  $\alpha$  debe aumentar y por lo tanto se produce un incremento en el consumo de potencia reactiva lo cual podría tener

un efecto adverso en el sistema AC. También existe el riesgo de falla de conmutación en el inversor debido a que el ángulo  $\gamma$  podría alcanzar un valor menor que el valor mínimo permitido. Si el loop “control del ángulo de extinción ( $\gamma$ ) del inversor” toma el control del rectificador y el loop “voltage dependent current order limit (VDCOL)” toma el control del inversor estos problemas pueden ser evitados, siendo el nuevo punto de operación (OP) el indicado en la Figura 7.

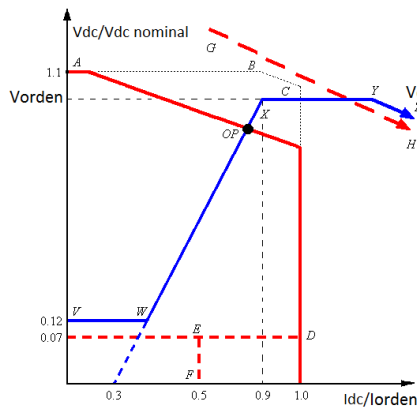


FIGURA 5 – Reducción de tensión AC lado rectificador

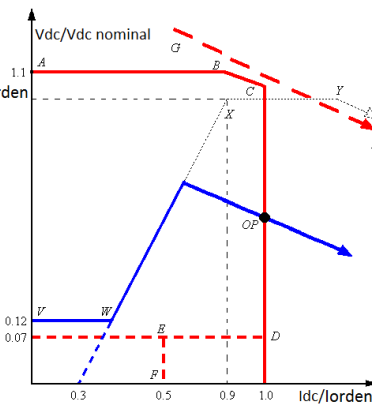


FIGURA 6 – Reducción de tensión AC lado inversor – loop CD

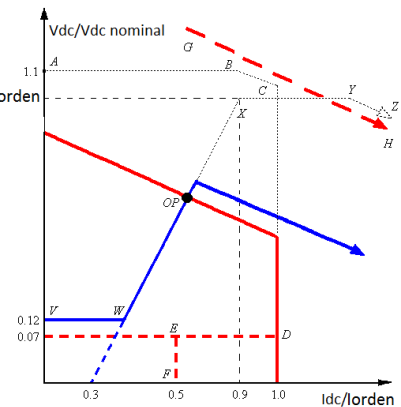


FIGURA 7 – Reducción de tensión AC lado inversor – loop GH

#### 4.0 - MODELADO EN ATP

El fabricante de la estación convertidora desarrolló un modelo de la misma para el programa PSCAD, pero no suministró el código fuente debido a razones de propiedad intelectual. Los autores de este trabajo recibieron toda la información del BtB a través de notas técnicas y algunos ítems como por ejemplo algoritmos de medida del ángulo de disparo  $\alpha$  y ángulo de extinción  $\gamma$  del inversor, filtrado de magnitudes AC, etc. fueron esquemáticamente mostrados en figuras sin ningún tipo de explicación adicional. Un modelo detallado de este BtB ha sido desarrollado por los autores para el programa ATP [1], [2].

Con el objetivo de llevar a cabo la validación de este modelo, la misma red de potencia utilizada por el fabricante en sus simulaciones con PSCAD fue modelada en ATP. Esta red consiste de una línea de transmisión y un circuito eléctrico equivalente de Thevenin a frecuencia industrial, para cada lado de la estación convertidora, como mostrado en la Figura 1.

#### 4.1 Transformadores convertidores

Cada uno de los bancos de transformadores monofásicos fueron modelados utilizando el Saturable Transformer Component del ATP. Este modelo permite variar fácilmente la posición del tap de acuerdo a los diferentes escenarios de operación del BtB.

Para cada unidad monofásica el fabricante suministró la característica del ensayo en vacío, el knee point y la inductancia de núcleo de aire. A partir de estos datos se obtuvieron dos características flujo - corriente resultantes de la utilización de las rutinas SATURA e HYSTERESIS HEVIA, de forma de tener en cuenta el efecto de la saturación, ciclo de histéresis y flujo residual. Dependiendo del tipo de fenómeno electromagnético en estudio el elemento Pseudo-nonlineal reactor (Type 98) o el elemento Pseudo-nonlineal hysteretic reactor (Type 96) fue conectado en bornes de los devanados primarios.

Debido al esquema de recierre trifásico implementado en los interruptores de la estación convertidora, los transformadores convertidores y los filtros deben ser reenergizados después del tiempo muerto. Como consecuencia es importante determinar la magnitud y evolución de los flujos residuales después de la desenergización de los transformadores convertidores. Estos flujos son obtenidos integrando los voltajes en bornes de los devanados, su magnitud y evolución dependen de las capacitancias conectadas a los transformadores, de la histéresis de los materiales magnéticos y de las “chopped currents” de los interruptores [3],[4].

El valor de la “chopped current” es obtenido a través de la teoría de Rizk y el “chopping number” es igual a  $12.2 \times 10^{-4} AF^{0.5}$  para los interruptores del BtB.

Las capacidades incluidas en el modelo son: a) capacidades de ecualización de los interruptores b) capacidades equivalentes entre fase y tierra de líneas de transmisión, interruptores, seccionadores, transformadores de medida, filtros, reactor shunt y transformadores convertidores.

#### 4.2 Puentes de tiristores

Cada válvula del convertidor consiste de cuatro módulos de tiristores, cada módulo contiene seis niveles de tiristores con sus circuitos snubber y un reactor externo saturable. Cada válvula del convertidor fue modelada por medio del circuito eléctrico equivalente mostrado en la Figura 8, suministrado por el fabricante. Cada tiristor fue representado por una llave tipo “Type 11 TACS - controlled switch”. Los valores de los parámetros de esta llave

son:  $V_{ig}=2.4$  kV,  $I_{hold}=0.35$  A,  $t_{DEION}=550$   $\mu$ s. El reactor saturable fue modelado como una inductancia constante con un valor correspondiente a la región saturada.

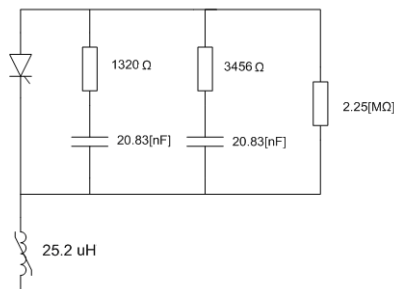


FIGURA 8 – Circuito equivalente de una válvula

#### 4.3 Loops de control DC

Las “Características Estáticas” de la Figura 2 no representan todos los loops de control DC del rectificador y del inversor.

Los restantes loops de control del rectificador son: a) loop “Mínimo ángulo de extinción”. Cuando el rectificador pasa a operar como inversor este loop evita que el valor del ángulo de extinción alcance un valor menor que el valor mínimo permitido. b) loop “Sobretensión AC”. Este loop actúa cuando se producen sobretensiones AC variando el ángulo  $\alpha$  con el objetivo de reducir las mismas. c) loop “Máximo ángulo  $\alpha$ ”. Este loop evita que el ángulo  $\alpha$  alcance un valor mayor que el valor máximo permitido.

Los restantes loops de control del inversor son: a) loop “Sobretensión AC” b) loop “Máximo ángulo  $\alpha$ ” c) loop “Mínimo ángulo  $\alpha$ ”. Este loop evita que el ángulo  $\alpha$  alcance un valor menor que el valor mínimo permitido.

Todos los loops de control DC son básicamente controles del tipo P y ellos fueron implementados en TACS con “S-blocks”.

Las señales de salida de todos los loops de control DC son combinadas a través de compuertas lógicas con el objetivo de seleccionar solamente una de ellas (SOUT), la cual será enviada a un “Phase Locked Oscillator”. La combinación de compuertas lógicas fue implementada en TACS con el dispositivo “Type 63”.

#### 4.4 Esquema de disparo

El esquema de disparo está basado en los conceptos presentados en la referencia [5]. Dicho esquema consiste de un generador de tren de pulsos, un limitador del ángulo de fase y un contador cíclico (ring counter). El sistema de control “Phase Locked Oscillator” (PLO) genera pulsos de disparo a intervalos relativos de 30°, altamente precisos, siendo este control casi independiente de las posibles distorsiones en los voltajes AC. Esta es una característica muy importante cuando se conecta un BtB a un “débil” sistema de potencia AC ya que en estas condiciones se evita una posible inestabilidad armónica. Un diagrama esquemático del esquema de disparo se presenta en la Figura 9.

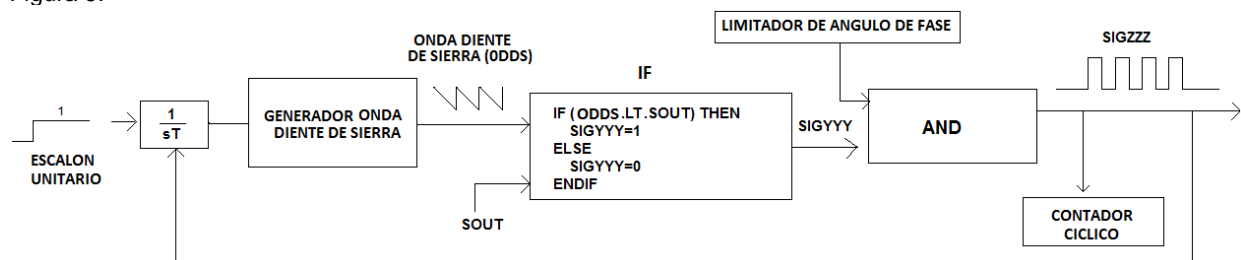


FIGURA 9 – Esquema de disparo

El principio básico del PLO se basa en lo siguiente: un integrador controlado, con  $T=$  ciclo/12, comienza a integrar un escalón unitario como señal de entrada, la resultante señal de salida en rampa entra a un bloque que genera una onda diente de sierra como señal de salida. Esta es una señal de entrada a un bloque “IF”. La otra señal de entrada a este bloque es SOUT cuyo valor es igual a cero en régimen permanente. En el instante en que la onda diente de sierra es menor que cero se genera un pulso de amplitud uno denominado SIGYYYY.

El limitador de ángulo de fase controla que la tensión aplicada en bornes del tiristor sea positiva, cuando esto sucede la señal de salida de este bloque es igual a uno. Este bloque es relevante en particular durante la recuperación del BtB después de una gran perturbación en el sistema AC.

Si las dos señales de entrada de la compuerta lógica AND son iguales a uno, un pulso de amplitud uno y duración un paso de integración, denominado SIGZZZ es generado.

El PLO comanda un contador cíclico de doce escalones el cual se mueve de un escalón al siguiente por cada pulso de entrada SIGZZZ. Durante la transición de un escalón a otro el contador envía este pulso SIGZZZ a un circuito monoestable.

Cuando el circuito monoestable recibe este pulso, genera un pulso rectangular de amplitud uno y duración 120° eléctricos, el cual es enviado a la puerta (gate) del tiristor para su disparo.

También cuando el pulso SIGZZZ es generado el integrador controlado es reseteado a cero y el proceso de generación de un pulso de disparo arranca nuevamente. La frecuencia del tren de pulsos de disparo es igual a  $12^*f$ , siendo  $f$  la frecuencia del sistema AC.

Si durante el intervalo de polarización positiva de un tiristor no se generó un pulso de disparo entonces el esquema de disparo aplica un pulso de disparo “forzado” (a 182° eléctricos en régimen permanente) al correspondiente tiristor.

Durante condiciones transitorias en el sistema AC, la señal SOUT es diferente de cero, por lo tanto en el instante de tiempo en el que la onda diente de sierra es menor que SOUT un pulso de amplitud igual a uno denominado SIGYYY es generado y el proceso siguiente es igual al explicado anteriormente. En este caso la frecuencia del tren de pulsos de disparo no es igual a  $12^*f$  hasta que las condiciones de régimen permanente sean alcanzadas nuevamente.

En lo que respecta a la implementación en ATP de este esquema de disparo todos los elementos entre la señal de entrada en escalón y la señal de salida SIGYYY fueron modelados utilizando la rutina TACS.

El limitador de ángulo de fase, el tren de pulsos y el contador cíclico fueron implementados como “modelo de usuario” en TACS usando el dispositivo “Type 69”.

#### 4.5 Control de sobre/sub tensión temporaria

El control de sobre/sub tensión temporaria maniobrará el reactor shunt de 70 MVAR y los filtros capacitivos cuando la magnitud de la tensión AC del lado de alta tensión alcance valores fuera de la banda de operación. Esta banda fue ajustada entre 0.0 pu y 1.07 pu para la estación convertora. El valor del límite inferior significa que el control de subtensión fue deshabilitado por el fabricante con el objetivo de evitar un indeseable “bang-bang switching” entre los equipos de compensación de potencia reactiva. El control de sobretensiones temporarias tiene dos tipos de características una de “tiempo inverso” y otra de “tiempo definido”, como presentado en la Figura 10.

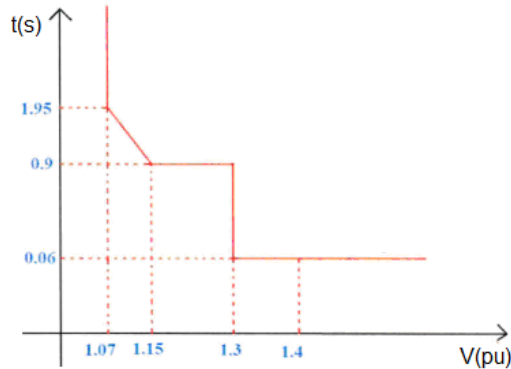


FIGURA 10 – Característica del control de sobretensión temporaria

Si el lado Melo 50 Hz opera como rectificador y ocurre una sobretensión temporaria, el control primeramente pondrá en servicio el banco de reactores shunt de 70 MVAR. Si la tensión permanece fuera de la banda de operación, entonces la siguiente acción de control será sacar de servicio bancos de filtros capacitivos, uno por vez. En el esquema de control se establece un tiempo mínimo de 100 ms entre las maniobras de equipos de compensación de potencia reactiva. Si el lado Melo 50 Hz opera como inversor el banco de reactores shunt de 70 MVAR ya se encuentra en servicio, por lo tanto la acción de control será sacar de servicio bancos de filtros capacitivos, uno por vez. Para el lado Melo 60 Hz las acciones de control serán sacar de servicio bancos de filtros capacitivos, uno por vez.

La característica de la Figura 10 fue modelada utilizando la rutina TACS, las maniobras de bancos de filtros capacitivos fueron implementadas utilizando llaves tipo “Type 11 TACS - controlled switch” tomando en cuenta los pasajes por cero de las corrientes por los filtros, para la apertura de las mismas.

Las restantes Funciones de Control Auxiliares de la Tabla 1 no fueron implementadas debido a que las mismas fueron diseñadas para no entrar en control durante eventos transitorios de corta duración.

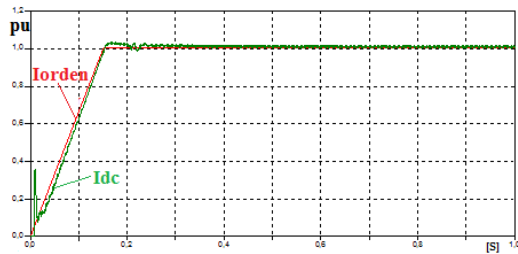
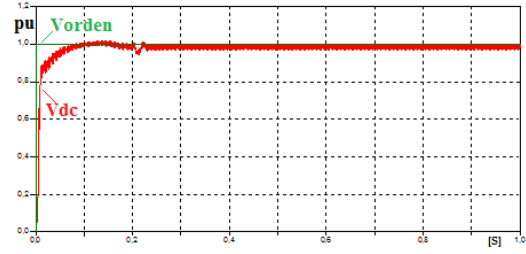
#### 4.6 Inicialización del modelo de la estación convertora

Un procedimiento de inicialización del modelo del BtB será presentado para su utilización en simulaciones en el dominio del tiempo. Para un determinado escenario de operación del sistema de potencia, el procedimiento de inicialización consta de las siguientes etapas: a) A partir de los resultados de una simulación de flujo de carga se obtienen la magnitud y ángulo de las tensiones AC en las barras Melo 50 Hz y Melo 60 Hz, la posición de los taps en los transformadores convertidores, número de bancos de filtros en servicio a ambos lados y las potencia activa y reactiva intercambiadas entre el BtB y ambas redes de potencia. b) Potencia, tensión y corriente DC en los lados rectificador/inversor, ángulo  $\alpha$  de disparo del rectificador, ángulo  $\gamma$  de extinción del inversor y potencia reactiva absorbida por el rectificador/inversor, son también obtenidas del flujo de carga. c) Dos fuentes trifásicas de tensión AC, “Type 14”, con parámetros iguales a las magnitudes y ángulos de los voltajes en las barras Melo 50 Hz y Melo



60 Hz se conectan a éstas desde el comienzo de la simulación con ATP y se retiran cuando las corrientes y tensiones DC son cercanas a sus valores de régimen permanente. d) La orden de tensión DC ( $V_{orden}$ ) se define como una función escalón entre cero y su valor de consigna. e) La orden de corriente DC ( $I_{orden}$ ) se define como una función rampa entre cero y su valor de consigna, con una pendiente ajustada para cada escenario de operación. f) Una vez que las principales variables en la simulación con ATP alcanzan su condición de régimen permanente se deben comparar los valores obtenidos contra los resultados del flujo de carga.

Las Figuras 11 y 12 muestran un ejemplo de los resultados obtenidos para la corriente y tensión DC aplicando este procedimiento de inicialización a un caso particular. En este caso el tiempo de subida de la rampa fue seleccionado igual a 150 ms y las dos fuentes trifásicas de tensión AC fueron removidas 200 ms después de iniciada la simulación. A partir de las figuras se observa que las condiciones de régimen permanente fueron alcanzadas a los 300 ms y que un pequeño transitorio ocurrió debido a la remoción de las fuentes "Type 14".

FIGURA 11 –  $I_{orden}$ ,  $I_{dc}$ FIGURA 12 –  $V_{orden}$ ,  $V_{dc}$ 

## 5.0 - APLICACIÓN Y REMOCIÓN DE UNA FALTA TRIFÁSICA COMPARACIÓN ATP VS PSCAD

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del modelo desarrollado en ATP, se aplicó una falta trifásica balanceada en el lado de alta tensión, primero en el lado rectificador y luego en el lado inversor. Los resultados obtenidos fueron comparados con los suministrados por el fabricante utilizando su modelo desarrollado en PSCAD. El escenario bajo estudio considera una potencia transferida DC igual a 512 MW desde Brasil a Uruguay, con una corriente DC igual a 3212.4 A, una tensión DC igual a 159.4 kV y con tensiones AC en ambos lados de magnitud igual a 1.0 pu. Luego de aplicada la falta trifásica la misma fue eliminada 100 ms después.

### 5.1 Falta trifásica en el lado rectificador

Las Figuras 13, 14 y 15 muestran las formas de onda de la corriente DC, tensión DC y tensión AC del lado rectificador obtenidas con ATP y PSCAD, durante los períodos pre-falta, durante la falta y post-falta.

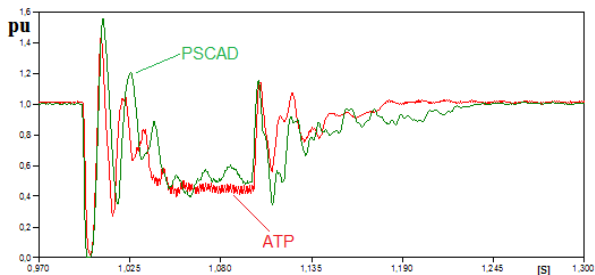


FIGURA 13 – Corriente DC

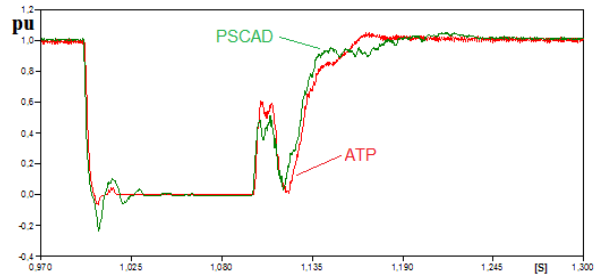


FIGURA 14 – Tensión DC

### 5.2 Falta trifásica en el lado inversor

Las Figuras 16, 17 y 18 muestran las formas de onda de la corriente DC, ángulo de disparo  $\alpha$  del rectificador y tensión AC del lado rectificador obtenidas con ATP y PSCAD, durante los períodos pre-falta, durante la falta y post-falta.

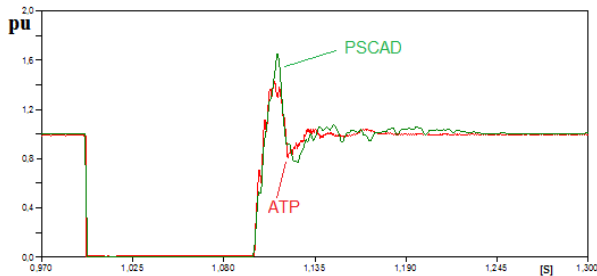


FIGURA 15 – Tensión AC lado rectificador

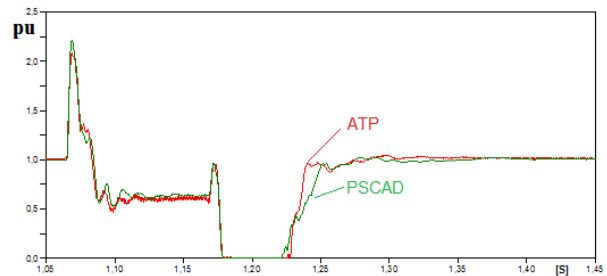


FIGURA 16 – Corriente DC

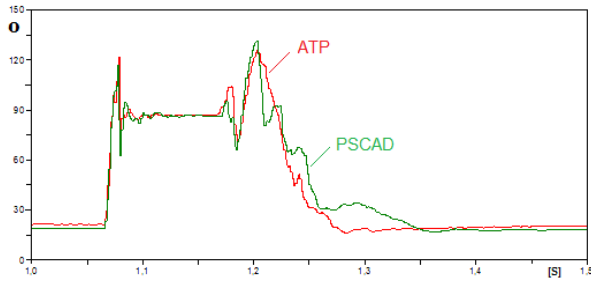


FIGURA 17 – Ángulo de disparo del rectificador

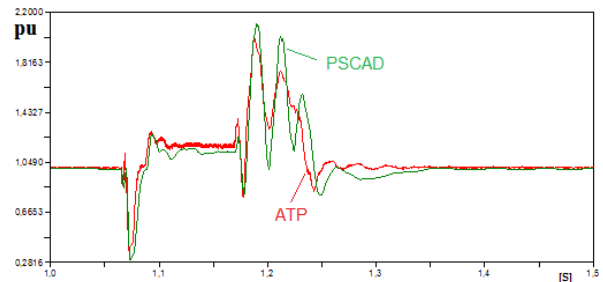


FIGURA 18 – Tensión AC lado rectificador

A partir de las Figuras 13 y 16 se observa que durante el período de falta las corrientes DC se ajustan a las nuevas consignas de acuerdo a las características estáticas de la Figura 2. La Figura 17 muestra un aumento en el valor del ángulo de disparo del rectificador, durante el período de falta, con el objetivo de satisfacer la nueva consigna de corriente e incrementar el consumo de potencia reactiva en el lado rectificador para controlar sobretensiones. La Figura 14 muestra que la tensión DC cae a cero durante el período de falta debido al “bypass pair” del lado rectificador. La Figura 16 muestra que luego de eliminada la falta la corriente DC cae a cero durante un cierto intervalo de tiempo antes de su recuperación, esto se debió a un inadecuado ajuste del loop de control del rectificador “control del ángulo de extinción ( $\gamma$ ) del inversor”. Esto fue revisado por el fabricante y los nuevos ajustes fueron incluidos en la versión actual del modelo.

La especificación técnica de la estación convertora establece que la misma luego de un recierre exitoso debe volver a transmitir como mínimo un 90% de la potencia pre-falta dentro de un intervalo de tiempo de 500 ms. Las figuras muestran que los modelos en ATP y en PSCAD alcanzan las condiciones pre-falta en similares instantes de tiempo y dentro de los 500 ms.

De la comparación de los resultados con ATP y PSCAD se concluye que el modelo desarrollado por los autores presenta resultados precisos. A partir de estos resultados y otros obtenidos de simulaciones de recierres trifásicos exitosos se considera como válido este modelo para estudios de transitorios electromagnéticos en los sistemas de potencia a ambos lados del BtB.

## 6.0 - CONCLUSIONES

Una nueva estación convertora de frecuencia HVDC Back-to-Back (BtB) de 500 MW fue puesta en servicio en marzo del año 2016. Este BtB interconecta los sistemas eléctricos de potencia de Uruguay (500 kV, 50 Hz) y Brasil (525 kV, 60 Hz) con una potencia nominal transferida, en ambas direcciones, de 508 MW.

Este artículo presenta las principales características y datos técnicos de esta estación convertora, se incluyen las Características Estáticas del rectificador e inversor que reflejan la operación de los loops de control DC en condiciones normales y con reducción de tensión AC.

Los autores desarrollaron un modelo de este BtB para el programa ATP que es el software de transitorios electromagnéticos utilizado en la empresa de energía eléctrica de Uruguay. Se presentan los aspectos más importantes del modelado realizado con respecto a: transformadores convertidores, puentes de tiristores, loops de control DC, esquema de disparo, control de sobretensiones temporarias y un procedimiento de inicialización del modelo.

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del modelo desarrollado en ATP, se aplicó una falta trifásica balanceada en el lado de alta tensión, primero en el lado rectificador y luego en el lado inversor. Los resultados obtenidos fueron comparados con los suministrados por el fabricante utilizando su modelo desarrollado en PSCAD. La principal conclusión es que este modelo de usuario en ATP permite llevar a cabo estudios de transitorios electromagnéticos con el objetivo de evaluar el impacto de este nuevo equipo en los sistemas de potencia de Uruguay y Brasil.

## 7.0 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Alternative Transients Program (ATP)-Rule Book*, Canadian / American EMTP User Group, 1987-92.
- [2] H. W. Dommel, "EMTP Theory Book", Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, Canada, 1992.
- [3] Y. Husianycia, M. Rioual, "Determination of the residual fluxes when de-energizing a power transformer/Comparison with on-site tests" *IEEE*, 2005.
- [4] M. Rioual, H. Digard, C. Martin, "Energizing and de-energizing of a 250 MVA transformer of a pumped storage power-plant: Modelling and its validation by on site tests" *IEEE*, 2013.
- [5] J. D. Ainsworth, "The Phase-Locked Oscillator- A New Control System for Controlled Static Convertors" *IEEE*, 1968.
- [6] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill. USA, 1994.



## 8.0 - DATOS BIOGRÁFICOS



**Graciela Calzolari** recibió el título de Ingeniera Industrial Opción Eléctrica de la Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, en 1986. Obtuvo el grado de Master en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica de la Universidade Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, Brasil, en 1990.

Trabaja en la Gerencia de Sector Estudios y Proyectos, UTE (empresa pública de energía eléctrica de Uruguay), desde 1984. Sus campos de interés son estudios de transitorios electromagnéticos, modelado de equipos de sistemas de potencia y generación eólica y fotovoltaica.



**Claudio Saldaña** recibió el título de Ingeniero Industrial Opción Eléctrica de la Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, en 1986. Obtuvo el grado de Master en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica de la Universidade Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, Brasil, en 1990.

Trabaja en UTE desde 1984, desempeñándose actualmente en la Gerencia de Sector Protecciones y Telecontrol. Sus campos de interés incluyen estudios de transitorios electromagnéticos, modelado de equipos de potencia y protecciones de sistemas de potencia, PMU y generación renovable.